

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240519001

荷载频率与粉粒含量对砂性土液化势 影响试验研究*

董林, 张嘉琪, 夏坤, 张岳文, 吴平川, 李燕

(河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 荷载频率与粉粒含量对砂性土液化势及液化特性的影响, 都有较多研究, 但认识并不充分。基于福建标准砂筛选1种0.5 mm以下砂土, 配以银川黄河粉砂筛选粉粒, 采用KTL动三轴试验系统, 分别进行等相对密度30%、70%, 粉粒含量0%、20%、40%、60%试样, 循环荷载频率分别为0.1 Hz和1 Hz下的均等固结动三轴液化试验。结果表明: 加载0.1 Hz相对于1 Hz, 稳定变形阶段持续时间长、循环次数多, 初始液化以后孔压波动幅度变得更大, 表现出强剪胀性。但是, 加载0.1 Hz液化强度低于1 Hz下, 且0.1 Hz下轴向双幅应变会急剧增大, 不应将这种液化模式归于“循环活动性”。加载0.1 Hz时, 土颗粒间移动、摩擦更充分, 拉压方向都能发挥出全段土样的强度, 滞回圈拉压方向相对对称且饱满。而加载1 Hz时, 由于试样顶端软化出现应力集中, 从变形增长阶段开始, 动应力出现衰减, 滞回圈表现出明显的拉压不对称, 深度液化阶段, 拉方向失去刚度和承载能力。总体来说, 加载0.1 Hz相对于1 Hz, 孔压发展更慢、最终孔压更低, 应变发展先慢后快, 抗液化强度更低。无论荷载频率和相对密度大小, 随着粉粒含量增大, 孔压上升和应变发展都越快, 抗液化强度呈下降趋势。

关键词: 砂性土; 粉粒含量; 动三轴试验; 荷载频率; 液化势

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1273-08

Experimental Study on Effects of Cyclic Loading Frequency and Silt Content on Liquefaction Potential of Sandy Soil

DONG Lin, ZHANG Jiaqi, XIA Kun, ZHANG Yuewen, WU Pingchuan, LI Yan

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The effects of cyclic loading frequency and silt content on the liquefaction potential and characteristics of sandy soil have been extensively studied, but the understanding remains insufficient. Based on Fujian standard sand, a type of sandy soil with particle size below 0.5 mm was selected, which was then mixed with silt particles sieved from the Yellow River silt in Yinchuan. Using the KTL dynamic triaxial test system, consolidated undrained cyclic triaxial liquefaction tests were conducted on soil samples with relative densities of 30% and 70% and silt contents of 0%, 20%, 40%, and 60% under cyclic loading frequencies of 0.1 Hz and 1 Hz, respectively. The results showed that compared to the 1 Hz load, under 0.1 Hz load, the stable deformation phase had a longer duration and a higher number of cycles. The amplitude of pore pressure fluctuation became larger after initial liquefaction, showing significant dilatancy. However, the liquefaction strength under 0.1 Hz was lower than that under 1 Hz, and the axial double amplitude strain increased sharply under 0.1 Hz loading. This liquefac-

* 收稿日期: 2024-05-19; 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708525, 52278171)资助

作者简介: 董林(1985—), 男, 副研究员, 硕导, 博士。主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail: donglin408@163.com

tion mode should not be classified as "cyclic mobility". Under 0.1 Hz load, the movement and friction between soil particles were more sufficient, the strength of the whole soil sample could be mobilized in both tensile and compressive directions, and the stress-strain hysteresis loop was relatively symmetrical and well-developed. In contrast, under 1 Hz load, stress concentration occurred due to softening at the top of the sample. From the deformation growth stage, the dynamic stress attenuated, and the stress-strain hysteresis loop showed obvious tensile-compressive asymmetry. During the deep liquefaction stage, the sample lost its stiffness and bearing capacity in the tensile direction. In general, compared to the 1 Hz load, under 0.1 Hz load, the pore pressure develops more slowly and reaches a lower final value, the strain initially develops slowly and then accelerates, and the liquefaction resistance is lower. Regardless of cyclic loading frequency and relative density, as the silt content increases, pore pressure rise and strain development become faster, and the liquefaction resistance shows a decreasing trend.

Keywords: sandy soil; silt content; cyclic triaxial test; cyclic loading frequency; liquefaction potential

0 引言

土在动荷载作用下存在速率效应和疲劳效应,土的速率效应与土的结构有关。在荷载作用下土的变形是以土颗粒排列的调整为前提的,但土颗粒排列的调整需要一定的时间才能完成。当加荷速率大时,土的变形不能充分发展。施加同样大小的荷载,加荷速率大时的变形比加荷速率小时的变形要小,即表现出更高的抵抗变形的能力。同样,欲使土发生破坏,加荷速率大时所需荷载要比加荷速率小时所需的荷载大,即表现出更高的抗剪强度^[1]。灾害调查表明,砂土液化除在地震荷载作用下经常发生外,交通和波浪荷载也可能导致土体产生液化现象。地震荷载频率一般为1~5 Hz,交通和波浪荷载的频率在0.1 Hz量级^[1]。荷载频率对砂土液化强度的影响,已有较多研究,但认识并不统一^[2-4]。荷载频率对砂土液化模式的影响,仅限于空心圆柱扭剪仪试验结果^[5-6],对量大面广的动三轴试验,还没有涉及。

另一方面,含细粒砂性土相对于纯净砂在自然界中分布更为广泛,并且,对历次地震液化实例的分析表明,平均粒径在0.075 mm左右的粉砂最容易液化^[7]。S. Thevanayagam等^[8-9]按临界粉粒含量 FC_{th} 将砂、粉颗粒混合物分为以砂粒为应力骨架和以粉粒为应力骨架。朱建群等^[10],L. Zuo等^[11]和A. Mohammadi等^[12]都尝试了无黏性混合土临界细粒含量的多途径判别研究。V. C. Xenaki等^[13]进一步研究证实了临界粉粒含量的存在,保持砂、粉混合物孔隙比一定,液化强度随粉粒含量先降再升,在粉粒含量44%处最低。周健等^[14]通过对原状土样进行共振柱和动三轴试验,发现液化强度与最大动

剪切模量均随细粒含量呈下凹抛物线型变化,细粒含量30%处强度与模量最低。王勇等^[15]采用动三轴试验研究了细粒含量对饱和砂土动弹性模量与阻尼比的影响,发现砂土的动弹性模量随细粒含量的增加而减小,但当超过细粒含量的临界值30%后,变化趋势则相反;阻尼比随细粒含量的增加呈现先增大后减小的趋势,其细粒含量的临界值也为30%。C. P. Polito等^[16]通过试验发现,当粉粒含量低于临界粉粒含量时,砂土的动强度主要由相对密度控制,与粉粒含量无关;当粉粒含量超过临界粉粒含量以后,砂土的动强度也由相对密度控制,也与粉粒含量无关。但是,粉粒骨架弱于砂粒骨架,相对密度对粉粒骨架的影响也弱于对砂粒骨架的影响。

本文基于福建标准砂筛选1种0.5 mm以下砂土,配以银川黄河粉砂筛选粉粒,采用KTL动三轴试验系统,分别进行等相对密度30%、70%,粉粒含量0%、20%、40%、60%试样,均等固结动三轴液化试验,循环荷载频率分别设为0.1 Hz和1 Hz,以期研究荷载频率与粉粒含量对砂性土液化势及液化特性的影响。

1 试验概况

1.1 试验土样

试验原材料为取自银川市永宁县黄河大桥附近的粉砂和购置的福建标准砂。标准砂为颗粒接近圆形的石英砂,黄河粉砂的矿物成份主要为石英和长石,经河流冲刷也有较好的磨圆度。为接近自然界中真实细砂与粉砂的粒径范围,将福建标准砂(0.075~2.0 mm)过0.5 mm筛选筛下“细”标准砂(0.075~0.5 mm),以黄河粉砂过0.075 mm筛选筛

下无塑性粉粒。参照《土工试验方法标准》^[17],对“细”标准砂进行筛分试验,通过密度计法对黄河粉粒进行颗粒分析,不同粉粒质量含量的砂-粉混合物级配曲线如图1所示。矿物成份、颗粒磨圆度、及级配曲线的连续性,说明此砂粒和粉粒混合物,对冲积成因砂性土具有一定的代表性。

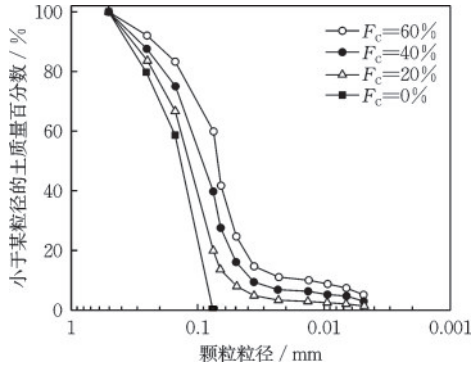


图1 试样颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curves of all samples

按照不同粉粒质量含量(0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、60%、80%、100%),将黄河粉粒与“细”标准砂充分混合均匀,逐个对不同粉粒含量的砂、粉混合物进行最大、最小干密度试验,应用式(1)换算出相应的最小、最大孔隙比,结果如图2所示。分别以等相对密度30%、70%,按照粉粒含量0%、20%、40%、60%制样,试样方案如图2所示,试样质量配比见表1。为表述方便,以FC40-30表示粉粒含量40%、相对密度30%的试样,以FC60-70表示粉粒含量60%、相对密度70%的试样,其他试样以此类推。

$$e = \frac{\rho_w G_s}{\rho_d} - 1 \quad (1)$$

式中, e 为孔隙比; ρ_d 为干密度; ρ_w 为4℃水的密度; G_s 为混合土体的颗粒比重,取2.7。

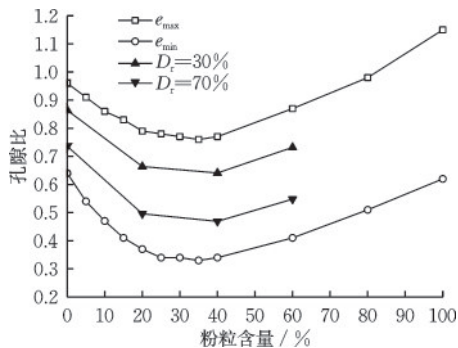


图2 砂、粉混合物最大最小孔隙比及试样方案

Fig.2 Maximum and minimum void ratios of sand and silt mixtures and soil sample schemes

表1 混合试样质量配比

Tab.1 Mix proportions of soil samples 单位:g

粉粒含量/%	$D_r=30\%$		$D_r=70\%$	
	砂粒质量	粉粒质量	砂粒质量	粉粒质量
0	281.00	0.00	302.06	0.00
20	251.87	62.97	280.34	70.09
40	192.01	128.00	214.72	143.14
60	121.16	181.74	135.38	203.06

1.2 试验仪器

本试验采用西安康拓力仪器设备有限公司生产的KTL伺服电机三轴试验系统。该系统由轴向加载主机(最大加载10 kN、最大频率5 Hz)、围压(压力、体积)控制器、反压(压力、体积)控制器、动态数据采集仪、水下荷重传感器、孔压传感器、以及安装有Geotechnical Smart Lab软件的电脑等组成,如图3所示。

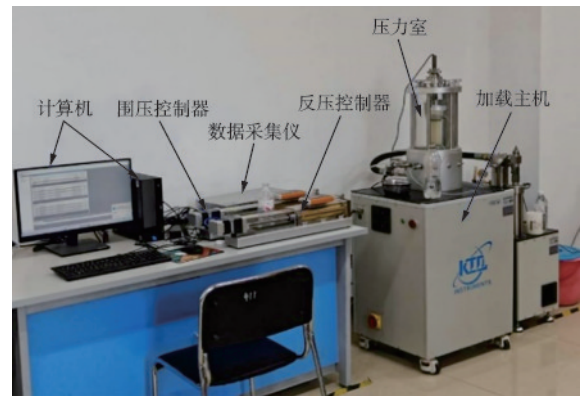


图3 KTL动三轴仪

Fig.3 KTL dynamic triaxial testing apparatus

1.3 试验方法

动三轴试样为直径50 mm、高100 mm的圆柱。参照《土工试验方法标准》^[17],在动三轴压力室底座上,用对开模干法击实制样,将砂、粉混合物充分搅拌均匀,分5层击实,各层接触面作刮毛处理。制样后,用反压控制器抽-10 kPa,使试样站立,拆对开模。安装压力室罩,利用拉伸帽合轴,注满围压水,加20 kPa围压,卸-10 kPa反压。从下至上对试样通CO₂约50 min,通无气水2~3 h,最后分级加反压。为使不同粉粒含量试样状态尽量一致,本次试验反压都加至280 kPa。通过B值检测,所有试样B值均达到0.96以上。将围压加至380 kPa,使试样所受有效围压为100 kPa,固结1 h。固结完成后,分

别施加频率为0.1 Hz和1 Hz的正弦波轴向动荷载,程序自动记录动应力、动应变、孔压时程。

2 试验结果与分析

为直观对比荷载频率对试验结果的影响,本节列出了对FC20-30试样施加频率1 Hz、循环应力比0.2下的试验结果(图4),以及对该试样施加频率0.1 Hz、循环应力比0.16下的试验结果(图5)。为突出荷载频率对砂土剪胀特性的影响甚至超过砂土密度,进一步列出对FC20-70试样施加频率1 Hz、循环应力比0.23下的试验结果(图6)。

KTL动三轴仪采用应力控制方式时,需预估土样刚度,加载过程中Geotechnical Smart Lab软件有

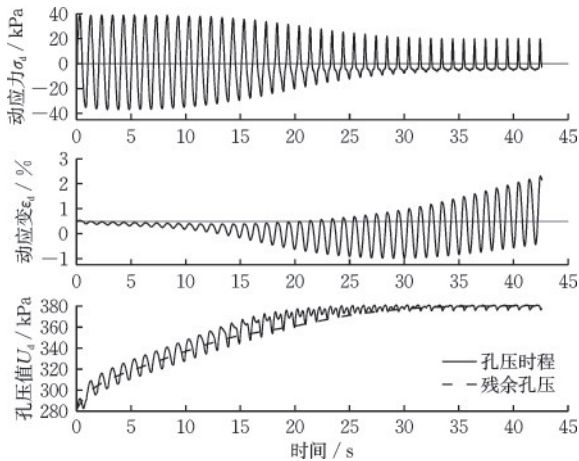


图4 FC20-30试样施加循环应力比0.2试验结果(1 Hz)
Fig.4 Test results of sample FC20-30 under cyclic stress ratio of 0.2 (1 Hz)

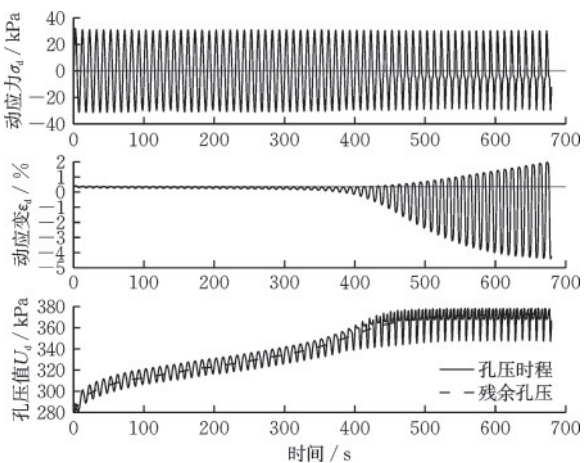


图5 FC20-30试样施加循环应力比0.16试验结果(0.1 Hz)
Fig.5 Test results of sample FC20-30 under cyclic stress ratio of 0.16 (0.1 Hz)

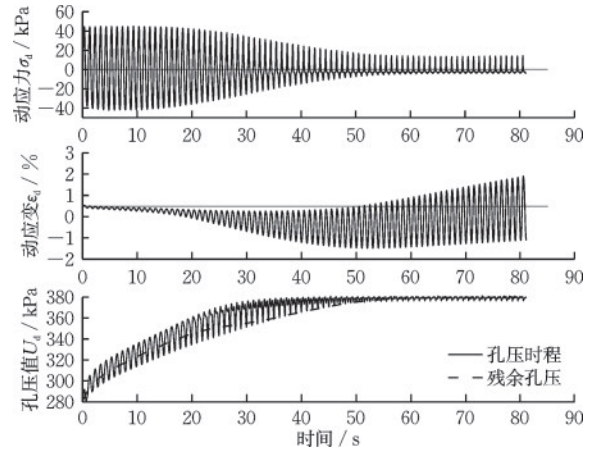


图6 FC20-70试样施加循环应力比0.23试验结果(1 Hz)
Fig.6 Test results of sample FC20-70 under cyclic stress ratio of 0.23 (1 Hz)

自适应刚度调整功能。加载频率为1 Hz时,当孔压比超过60%后,土样刚度迅速弱化,自适应刚度来不及调整,即出现力加不上去(达不到目标动应力水平)的现象,图4和图6给出了这种动应力衰减的具体形式。而当加载频率为0.1 Hz时,由于加载较慢,对本文所有试样,仪器可实现自适应刚度调整,如图5所示,动应力幅值保持恒定。

饱和砂土在动荷载作用下的变形分为2个阶段,第一变形阶段,变形幅值很小,随循环作用次数没有明显的增加。当循环作用达到一定次数后,变形幅值的增长加快,变形进入第二发展阶段^[7]。加载频率为1 Hz时,图4和图6应变时程曲线显示,第一变形阶段持续时间短、循环次数少,而当加载频率为0.1 Hz时,第一变形阶段持续时间长、循环次数多,如图5应变时程曲线所示。

图4和图6孔压时程曲线显示,密实砂相对于松砂,孔压波动幅度更大,体现了砂土剪胀特性,但是当孔压达到初始液化以后,加载频率为1 Hz时,孔压波动幅度都很小。而加载频率为0.1 Hz时,当孔压达到初始液化以后,孔压波动幅度反而变得更大,显示出相对密度30%砂土不应出现的剪胀特征,如图5孔压时程曲线所示。

2.1 液化模式

应力应变滞回圈能够反应土体动本构特性,对上述图4~图6试样滞回圈进行分析,分别选取稳定变形阶段、变形增长阶段、初始液化阶段、及深度液化阶段典型滞回圈,如图7~图9所示。稳定变形阶段,三者滞回圈形态上没有明显差异。变形增长阶段,图7和图9已表现出明显的拉压不对称性,从

滞回圈起点开始,往压方向占滞回圈面积的绝大部分,而图8(0.1 Hz)拉压相对对称。初始液化阶段,图8滞回圈更饱满,表现出更强的耗能特性,且拉压方向同时表现出“刚度硬化”^[5],而图7和图9滞回圈中间扁平,压方向“硬化”,拉方向“硬化”很微弱。在文献[18]中,将这种拉压显著不对称的滞回圈描述为“尖叶状”。深度液化阶段,图8滞回圈中间扁平,两端拉压方向“硬化”更甚,而图7和图9滞回圈中间变得更细,压方向“硬化”,拉方向失去刚度和承载能力。

上述对比,体现出加载0.1 Hz时,土颗粒相互间移动、摩擦更充分,耗能更多,拉方向的强度通过

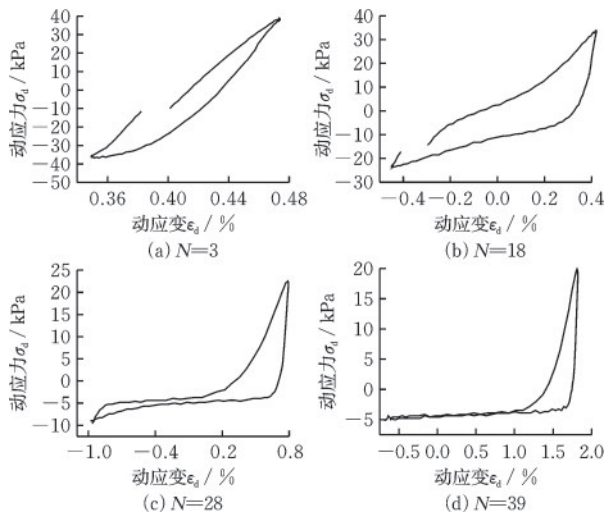


图7 FC20-30试样施加循环应力比0.2典型滞回圈(1 Hz)
Fig.7 Typical stress-strain hysteresis loop of sample FC20-30 under cyclic stress ratio of 0.2 (1 Hz)

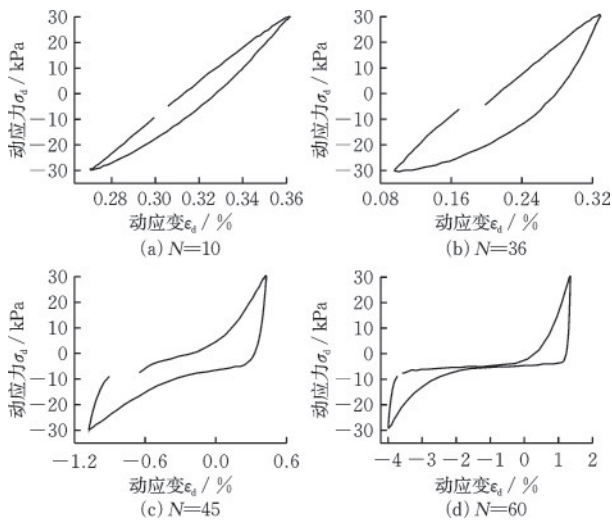


图8 FC20-30试样施加循环应力比0.16典型滞回圈(0.1 Hz)
Fig.8 Typical stress-strain hysteresis loop of sample FC20-30 under cyclic stress ratio of 0.16 (0.1 Hz)

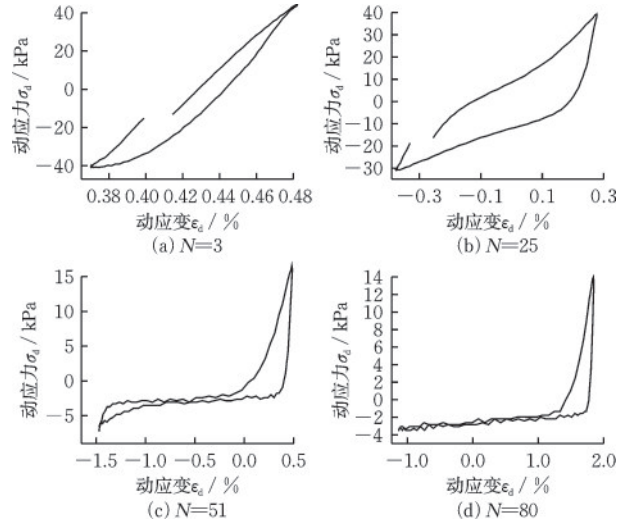


图9 FC20-70试样施加循环应力比0.23典型滞回圈(1 Hz)
Fig.9 Typical stress-strain hysteresis loop of sample FC20-70 under cyclic stress ratio of 0.23 (1 Hz)

颗粒摩擦更能发挥出来。而加载1 Hz时,在振动荷载作用下,砂土颗粒向下移动,水由于水头差向上运动,导致试样顶端土颗粒变少、含水率增大,快速受拉时(1 Hz),由于应力集中,只有顶端受拉,刚度和耗能特性变得越来越小。同时,试样顶端的软化及应力集中,也会导致力加不上去而出现动应力衰减。而加载0.1 Hz时,土样受拉较慢,可以发挥出全段试样的强度和耗能特性。由于加载0.1 Hz时,整个土样的颗粒相互间都产生移动、摩擦,则表现出更强的剪胀性,这就解释了图5初始液化后,孔压波动幅度反而变得更大的原因。

加载频率0.1 Hz时,孔压曲线表现出的强剪胀性,应变第一阶段的长稳定性,液化后滞回圈两端“硬化”的表现,易使人认为这是“循环活动性”现象^[5-6]。但是,图5中应变曲线变形第二阶段双幅应变急剧增大,不符合“循环活动性”变形发展缓慢甚至会停止发展的定义^[7]。

2.2 残余孔压和双幅应变

动应力循环一周,应力为0时的孔压为残余孔压。以残余孔压达到围压时的振次 N_r ,定义为完全液化。以振次比 N/N_r 为横坐标,以孔压比(残余超孔压 ΔU 与有效围压 σ'_s 比值)为纵坐标,可以建立残余孔压模型^[7]。等相对密度30%试样的孔压模型如图10所示,等相对密度70%试样的孔压模型如图11所示。总体来说,加载0.1 Hz相对于1 Hz,由于能发挥出更强的剪胀性,孔压发展更慢,最终孔压更低,而随着粉粒含量增大,无论荷载频率和相对密度大小,孔压上升都越快。

以上述 N_i 振次的轴向双幅应变为 ϵ_{daf} , 定义每一振次的双幅动应变 $\epsilon_{da}/\epsilon_{daf}$ 为双幅应变比。为考查荷载频率与粉粒含量对双幅动应变发展规律的影响, 分别建立图 12(等相对密度 30% 试样)和图 13(等相对密度 70% 试样)。由图可见, 加载 0.1 Hz 时的双幅应变, 第一阶段发展慢, 第二阶段发展快, 与加载 1 Hz 时显著不同。随着粉粒含量增大, 无论荷载频率和相对密度大小, 双幅应变都发展越快。

综合对比图 10 与图 11、图 12 与图 13, 等相对密度 70% 试样相对于等相对密度 30% 试样, 荷载频率和粉粒含量对孔压与应变发展的影响, 相对要小一些, 表现为曲线簇拥更集中一些。

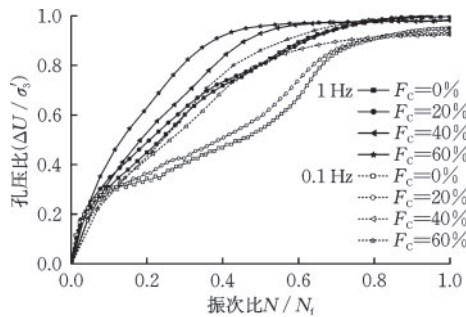


图 10 等相对密度 30% 试样残余孔压发展曲线
Fig.10 Development curves of residual pore pressure for samples with 30% relative density

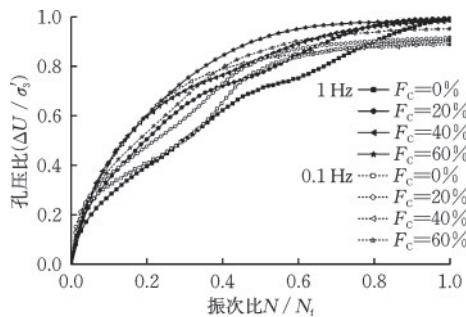


图 11 等相对密度 70% 试样残余孔压发展曲线
Fig.11 Development curves of residual pore pressure for samples with 70% relative density

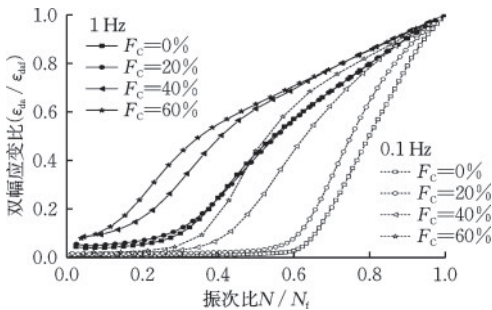


图 12 等相对密度 30% 试样轴向双幅应变发展曲线
Fig.12 Development curves of double amplitude axial strain for samples with 30% relative density

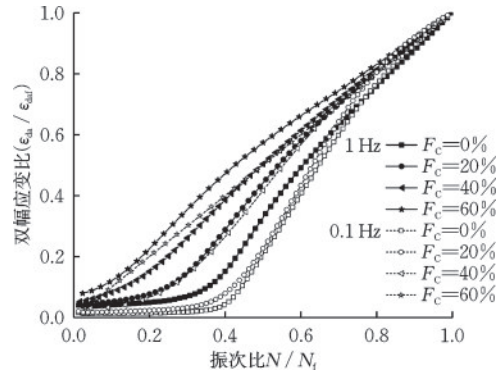


图 13 等相对密度 70% 试样轴向双幅应变发展曲线
Fig.13 Development curves of double amplitude axial strain for samples with 70% relative density

2.3 抗液化强度

液化标准有孔压标准和应变标准^[7], 本文选择孔压标准, 即定义孔压峰值达到围压时的振次为液化振次 N_l 。一组试样先后制 4 个试样, 在 1 个荷载频率下, 分别施加 4 个循环应力比, 拟合出抗液化强度与振次关系曲线, 相对密度 30% 试样结果如图 14 所示, 相对密度 70% 试样结果如图 15 所示。

在图 14、15 中, 分别取振次 20 次、30 次对应拟合曲线上的循环应力比, 可得振次 20 次、30 次下抗液化强度与粉粒含量关系曲线, 见图 16、17。总体来说, 加载 0.1 Hz 相对于 1 Hz, 抗液化强度更低, 体现了土抗剪强度的速率效应, 即加载越慢强度越低。在 2 种加载频率下, 抗液化强度都随粉粒含量增长而下降。对这个现象的解释是, 对于以砂粒为应力骨架的试样, 粉粒存在于砂粒接触点与接触面之间, 在动荷载作用下, 粉粒起“滚珠”效应, 使抗液化强度下降, 而当粉粒承担应力骨架以后, 正如文献[16]所述, 粉粒骨架弱于砂粒骨架。因此, 粉粒含量对砂性土抗液化强度的影响, 整体趋势是使其下降。

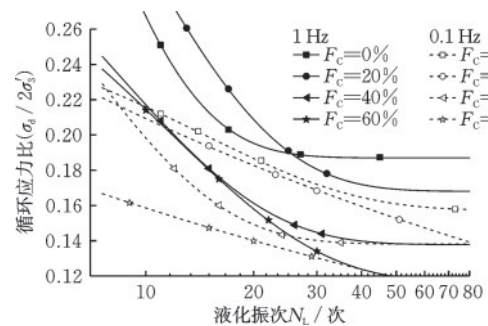


图 14 等相对密度 30% 试样循环应力比与振次关系曲线
Fig.14 Relationship curves of cyclic stress ratios with number of liquefaction cycles for samples with 30% relative density

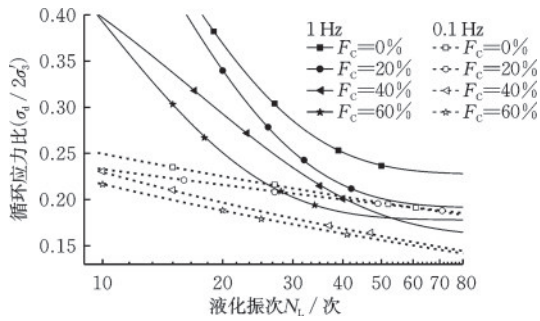


图 15 等相对密度 70% 试样循环应力比与振次关系曲线
Fig.15 Relationship curves of cyclic stress ratios with number of liquefaction cycles for samples with 70% relative density

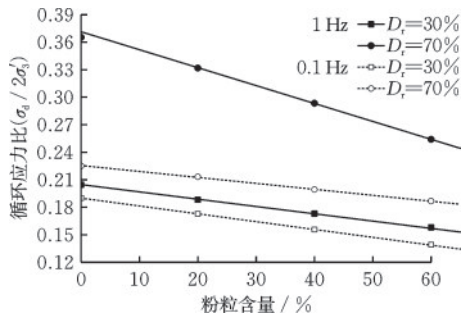


图 16 振次 20 次抗液化强度与粉粒含量关系曲线
Fig.16 Relationship curves of liquefaction resistance for 20 cycles with silt content

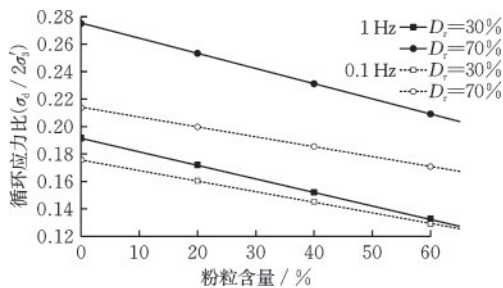


图 17 振次 30 次抗液化强度与粉粒含量关系曲线
Fig.17 Relationship curves of liquefaction resistance for 30 cycles with silt content

3 结 论

本文选用一种“细”标准砂和黄河粉粒,分别以等相对密度 30%、70%,配制粉粒含量 0%、20%、40%、60% 试样,采用 KTL 动三轴试验系统,在 2 种加载频率下,进行均等固结动三轴液化试验,得到主要结论如下:

(1) 低频荷载作用下,稳定变形阶段持续时间长、循环次数多,当孔压达到初始液化以后,孔压波

动幅度反而变得更大,表现出强剪胀性。但是,荷载频率 0.1 Hz 下抗液化强度低于 1 Hz 下,且 0.1 Hz 下双幅动应变会急剧增大,不应将这种液化模式归于“循环活动性”。

(2) 加载 1 Hz 时,在振动荷载作用下,砂土颗粒向下移动,水由于水头差向上运动,导致试样顶端土颗粒变少、含水率增大。快速加载时,由于应力集中,试样顶端受力,刚度和耗能特性都变得越来越小,从变形增长阶段开始,动应力出现衰减,滞回圈表现出明显的拉压不对称,深度液化阶段,拉方向失去刚度和承载能力。

(3) 加载 0.1 Hz 时,由于加载较慢,整个土样的颗粒相互间都产生移动、摩擦,耗能更多,拉方向的强度通过颗粒摩擦更能发挥出来,滞回圈拉压方向相对对称且饱满。同时,也正是由于整个土样的颗粒相互间都产生移动、摩擦,则表现出更强的剪胀性。

(4) 总体来说,加载 0.1 Hz 相对于 1 Hz,孔压发展更慢、最终孔压更低,应变发展先慢后快,而抗液化强度却更低。无论荷载频率和相对密度大小,随着粉粒含量增大,孔压上升和应变发展都越快,抗液化强度呈下降趋势。

参 考 文 献:

[1] 张克绪,凌贤长,等. 岩土地震工程及工程振动[M]. 北京:科学出版社,2016: 17-18.
[2] 张建民,王稳祥. 振动频率对饱和砂土动力特性的影响[J]. 岩土工程学报,1990, 12(1): 89-97.
Zhang J M, Wang W X. Effect of vibration frequency on dynamic behavior of saturated sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 89-97.
[3] 郭莹,贺林. 振动频率对饱和砂土液化强度的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(6): 618-623.
Guo Y, He L. The influences of the vibration frequencies on liquefaction strength of saturated sands [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(6): 618-623. (in Chinese)
[4] 丰土根,张礼明. 振动频率对饱和松砂动力特性影响试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 11-14, 76.
Feng T G, Zhang L M. Experimental study on effect of vibration frequency on dynamic behaviors of saturated loose sands [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(3): 11-14, 76. (in Chi-

- nese)
- [5] 许成顺,王冰,杜修力,等.循环加载频率对砂土液化模式的影响试验研究[J].土木工程学报,2021,54(11):109-118.
Xu C S, Wang B, Du X L, et al. Experimental study on effect of cyclic loading frequency on liquefaction mode of sand [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 109-118. (in Chinese)
- [6] 潘霞,许成顺,徐佳琳,等.饱和砂土循环液化模式影响因素试验研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3):635-642.
Pan X, Xu C S, Xu J L, et al. Experimental study on influencing factors of circulating liquefaction model of saturated sand soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 635-642. (in Chinese)
- [7] 张克绪,谢君斐.土动力学[M].2版.北京:地震出版社,2022:48-49.
- [8] Thevanayagam S, Shenthan T, Mohan S, et al. Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(10): 849-859.
- [9] Thevanayagam S, Martin G R. Liquefaction in silty soils: Screening and remediation issues [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9-12): 1035-1042.
- [10] 朱建群,孔令伟,高文华,等.无黏性混合土临界细粒含量的多途径判别研究[J].水利学报,2015,46(9):1103-1109.
Zhu J Q, Kong L W, Gao W H, et al. Multi-ways to identify the transitional fine content of cohesionless soil with fines [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1103-1109. (in Chinese)
- [11] Zuo L, Baudet B A. Determination of the transitional fines content of sand-non plastic fines mixtures [J]. Soils and Foundations, 2015, 55(1): 213-219.
- [12] Mohammadi A, Qadimi A. A simple critical state approach to predicting the cyclic and monotonic response of sands with different fines contents using the equivalent intergranular void ratio [J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(5): 587-606.
- [13] Xenaki V C, Athanasopoulos G A. Liquefaction resistance of sand-silt mixtures: An experimental investigation of the effect of fines [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(3): 1-12.
- [14] 周健,杨永香,贾敏才,等.细粒含量对饱和砂土液化特性的影响[J].水利学报,2009,40(10):1184-1188.
Zhou J, Yang Y X, Jia M C, et al. Effect of fines content on liquefaction properties of saturated silty sands [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(10): 1184-1188. (in Chinese)
- [15] 王勇,王艳丽.细粒含量对饱和砂土动弹性模量与阻尼比的影响研究[J].岩土力学,2011,32(9):2623-2628.
Wang Y, Wang Y L. Study of effects of fines content on dynamic elastic modulus and damping ratio of saturated sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2623-2628. (in Chinese)
- [16] Polito C P, Martin J R. Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(5): 408-415.
- [17] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社.
- [18] 李瑞山,陈龙伟,袁晓铭,等.荷载频率对动模量阻尼比影响的试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(1):71-80.
Li R S, Chen L W, Yuan X M, et al. Experimental study on influences of different loading frequencies on dynamic modulus and damping ratio [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 71-80. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)